

各種液体中での気泡と衝撃波の干渉に関する研究

著者	山田 潔
号	1744
発行年	1995
URL	http://hdl.handle.net/10097/7017

氏 名	山 田 潔
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学 位 授 与 年 月 日	平 成 8 年 3 月 26 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項
研 究 科 , 専 攻 の 名 称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械工学専攻
学 位 論 文 題 目	各種液体中での気泡と衝撃波の干渉に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 高山 和喜
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 高山 和喜 東北大学教授 神山 新一 東北大学教授 井上 督 東北大学教授 小林 陵二

論 文 内 容 要 旨

気泡と衝撃波の干渉は、自然界ばかりでなく人工的にも現代社会の様々なところで起こる現象で、衝撃波工学の基礎および応用の重要な研究課題である。

気泡が一方から衝撃波作用を受けたとき、気泡界面の曲率をもった形状と流れ場の非球対称性のため、いわゆる気泡の非球状的な崩壊が起こる。特に衝撃波が気泡に最初に到達した界面の外周近傍では、反射膨脹波により圧力が低下したあとで、他の部分より著しい液体粒子の流れこみにより圧力が局所的に上昇し液体ジェットが形成される。気泡の非球状的な崩壊では、気泡の急速な収縮によって気泡内部に高温高压状態が得られるとともに、液体ジェットが界面に衝突することによって高压状態が得られる。このように気泡崩壊では、入射衝撃波のエネルギーの一部を初期の気泡が占める空間よりもさらに小さな非常に狭い領域内に集束でき、また、一旦集束されたエネルギーは圧縮波を生成して液体中に解放される。

このような気泡と衝撃波の干渉過程は、いくつかの条件、すなわち、衝撃波の波形特性、気泡の大きさ・形状、液体・気体の物性、特に液体の粘度および液体と気体の音速の比に支配される。

しかし、それらのうち媒体の物性が様々な場合に関しては知識の蓄積を欠き、また、全般的に定量的な知識は断片的である。それゆえ、気泡と衝撃波の干渉に関連して起こる様々の現象を解釈し、また、応用するとき、物性の異なる各種の液体中の気泡と衝撃波の干渉を理解することが特に重要な研究課題となる。また、気泡と衝撃波の複雑な干渉過程の数値シミュレーションを検証するためにも定量的な実験結果は必要である。

本研究では、各種液体中での衝撃波と気泡との干渉を二重露光ホログラフィー干渉法を中心に光学可視化し、得られた写真を精密に画像解析してこれを定量的に明らかにする。また、これらの結果を解釈するために衝撃波と気泡との干渉過程を数値模擬し詳細に解明する。各種液体中での気泡と衝撃波の干渉に関する基礎研究として、無限に広い液体中での安定した形状の単一気泡と衝撃波との干渉という理想状態に等しいと見なしてよい実験条件の下で、気泡と衝撃波の干渉という理想状態に等しいと見なしてよい実験条件の下で、気泡と衝撃波の干渉場を定量的に可視化する。さらに、一つの応用として、火山の火道内に現れるマグマの発泡で発生する気泡と衝撃波との干渉をとり上げる。

第1章は緒論である。

第2章は二種液体中での衝撃波伝播に関する実験的研究である。気泡と衝撃波の干渉では、衝撃波の波形特性は気泡の運動を支配するので、まず、各種の媒体に対して衝撃波の特性を明らかにする。また、気泡は必ずしも一樣な媒体中で発生するとは限らず、したがって、一般には非一樣媒体中の衝撃波を明らかにする必要がある。それゆえ、基礎として二種液体中の衝撃波を明らかにする。

また、第2章では、衝撃波生成法および定量的な観測に用いる可視化法と圧力測定法を説明する。衝撃波は、薬量10 mgのアジ化銀をペレット状に加工した微小爆薬にNd:YAGレーザーを照射し起爆することによって得た。衝撃波と干渉する気泡の観測には、影写真法やシュリーレン法を用いた従来の可視化法は定量的観測ができないため、流れ場の密度変化を定量的に、かつ詳細に可視化することができる二重露光ホログラフィー干渉計法を用いた。液体中の衝撃波の圧力測定には、従来、圧力変換器を用いて間接的に測定を行った。しかし、圧力変換器の出力信号は、変換器自体がもつ固有振動数と受圧面積に依存するため、正しい圧力波形を測定することができない。本研究では二重露光ホログラフィー干渉計法により非接触に衝撃波の圧力波形を計測し、アジ化銀の液中爆発による衝撃波の圧力波形を初めて定量的に明らかにした。

以上の実験方法により、シリコン油と水からなる成層液体中の衝撃波を可視化し、二種液体界面と衝撃波の干渉による衝撃波の反射・屈折形態を分類した。

第3章は、気泡と衝撃波の干渉および二種液体中の衝撃波の数値シミュレーションである。衝撃波が干渉した気泡の変形過程は、狭い空間内で進行する高速度現象であるため、実験的観測は容易でない。数値シミュレーションは、気泡と衝撃波の干渉を定量的に模擬でき、また、実験的観測が難しい微細な現象を理解する上で重要である。しかし、気泡と衝撃波の干渉では、気液界面が大変形し、さらに、変形した界面同士が衝突するため数値的模擬も容易でない。そこで本章では、気泡と衝撃波の干渉を、GRP/MIT法を用いて従来の方法よりも正確に模擬し、干渉過程を理論的に詳細に明らかにするとともに、この計算法が有効であることを示す。

また、二種液体中の衝撃波を二次精度風上型TVD差分法を用いて数値的に模擬し、第2章の実験と直接的に対比し、計算法が有効であることを示す。

第4章は、本論文の中心的研究項目で、液体中での衝撃波と気泡との干渉に関する基礎的な研究、および一つの応用として基礎研究の知見に基づいた火山噴火の解明のための模擬実験について述べる。

まず、基礎研究では液体中での衝撃波と単一気泡との干渉過程を可視化した。音速の異なる二種の気体および音速と粘度の異なる三種の液体を組み合わせ、衝撃波と気泡との干渉におよびず液体の粘性の効果および液体と気泡を形成する気体の音速の比の効果を、主に二重露光ホログラフィー干渉計法を用いる可視化により明らかにした。

気泡と衝撃波の干渉で、衝撃波の気泡界面への最初の衝突点付近での局所的な高圧の発生および集積されたエネルギーの解放による圧縮波ないし衝撃波が伝播する様子を時系列的に可視化し、これを精密に画像解析して圧力場を定量的に求め、高圧領域および圧縮波発生の機構を実験的に明らかにした。このような実験結果から、気泡と衝撃波の干渉過程では、衝撃波が最初に衝突した気泡前面外周で時間経過とともに圧力が上昇し入射衝撃波の過剰圧を越えること、液体ジェットと界面の衝突の水撃圧は入射衝撃波過剰圧の数倍以上に達する場合が現れること、気泡の崩壊後の急速な膨脹によって生成される圧縮波および液体ジェットの衝突によって生成される圧縮波の伝播の挙動を明らかにした。

次に、火山噴火の発生の機序を解明する研究の一環として、気液二相流を可視化する縦型衝撃波管を製作した。火山噴火は、火山内部のマグマ溜まり中での発泡で現れた気泡と地震等で発生する波動との相互干渉が原因であるとの最近の報告があるが、その仕組みはいまだ解明されていない。火山の噴火現象を衝撃波工学の立場から解明することは非常に重要であるが、火山内部の構造およびそこで起こる発泡とそれに続く気泡と衝撃波の干渉を実験的に再現し、そのような高速度の現象を詳細に観測する試みはない。本研究では、縦型液体衝撃波間および拡散光に用いる二重露光ホログラフィー干渉計法により、円形断面管内を広い視野で可視化すること、および、炭酸水を減圧し二酸化炭素気泡を発泡させこれを衝撃波と干渉させることに初めて成功した。

第5章は結論である。

審 査 結 果 の 要 旨

各種液体中を伝播する衝撃波の挙動およびその気泡との干渉現象の解明は、衝撃波工学の基礎研究課題であるばかりでなく、衝撃波現象が水力機械に現れるキャビテーション現象、衝撃波フォーカシングを用いる医療に現れる生体損傷の解明など様々の応用に関連する重要な研究課題である。

本論文は、各種液体中に現れる気泡と衝撃波の干渉の実験的、数値解析的研究の成果をまとめたもので、全編5章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、詳細な光学可視化観察により微小爆発で発生した球状衝撃波の構造を初めて観察に成功し、さらに異種液体界面での衝撃波の屈折現象を分類している。これは新しい有用な知見である。

第3章では、異種液体中を伝播する衝撃波および衝撃波と気泡との干渉の解明に有効な数値シミュレーション法を提唱し、第2章の実験結果と対比しよい一致を得て、数値解析法の有用性を示している。

第4章では、第2章で開発した気泡発生法、光学可視化法などの実験技術および第3章で展開した数値解析を駆使して、各種液体中に発生した各種気体の泡と衝撃波との干渉現象を観測し、気泡が衝撃波の作用で変形・収縮し、高速の液体ジェットを発生する機序を定量的に明らかにし、これらの現象に液体の音速と気泡内の気体の音速の比および液体の粘性が重要な影響を与えることを明らかにしている。これは重要な成果である。

また、第4章で得た成果が火山噴火の先駆けとなる火道中の発泡現象とその後の気泡の細分化の過程に重要な寄与を与えることを示し、縦型液体衝撃波管を試作している。これは今後のこの研究課題の発展の新しい方向を示すもので、重要な応用である。

第5章は、結論である。

以上要するに本論文は、異種液体界面での衝撃波の屈折および各種液体中での気泡と衝撃波との干渉現象を定量的な可視化計測を中心に実験的、数値解析的に明らかにし、流体力学、衝撃波工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。